

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 757 183

21 N° d'enregistrement national : 96 15435

51 Int Cl<sup>6</sup> : C 30 B 33/08, C 30 B 33/12, H 01 L 21/02

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 16.12.96.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 19.06.98 Bulletin 98/25.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule.*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE  
ATOMIQUE ETABLISSEMENT DE CARACT SCIENT TECH  
ET INDUST — FR et CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS — FR.

72 Inventeur(s) : DUJARDIN GERALD, MAYNE  
ANDREW, SEMOND FABRICE et SOUKIASSIAN  
PATRICK.

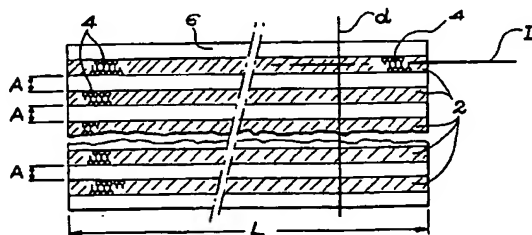
73 Titulaire(s) :

74 Mandataire : BREVATOME.

54 FILS ATOMIQUES DE GRANDE LONGUEUR ET DE GRANDE STABILITE, PROCEDE DE FABRICATION DE  
CES FILS, APPLICATION EN NANO-ELECTRONIQUE.

57 Fils atomiques de grande longueur et de grande stabilité, procédé de fabrication de ces fils, application en nano-électronique.

Les fils (2) sont formés sur la surface d'un substrat (6) en SiC et sont des assemblages rectilignes de dimères d'un élément choisi parmi Si et C. Pour les obtenir, on forme des couches de l'élément sur la surface et on construit l'ensemble au moyen de recuits de cette surface munie des couches.



FR 2 757 183 - A1



**FILS ATOMIQUES DE GRANDE LONGUEUR ET DE GRANDE  
STABILITE, PROCEDE DE FABRICATION DE CES FILS,  
APPLICATION EN NANO-ELECTRONIQUE**

5

**DESCRIPTION**

**Domaine technique**

La présente invention concerne des fils atomiques de grande longueur et de grande stabilité ainsi qu'un  
10 procédé de fabrication de ces fils.

L'invention s'applique tout particulièrement aux domaines de la nano-électronique, de l'optique et de la micromécanique.

15 **Etat de la technique antérieure**

Divers travaux ont été consacrés à la fabrication de fils atomiques sur les surfaces de métaux ou de semi-conducteurs.

La formation de fils atomiques résulte de  
20 processus mettant en jeu les propriétés structurelles, dynamiques et de réactivité des surfaces solides à l'échelle atomique.

Le problème de la fabrication de fils atomiques est aussi étroitement lié à celui de la visualisation  
25 de ces fils formés d'atomes.

Compte tenu de leurs dimensions sub-nanométriques (inférieures ou égales à 1 nm), la visualisation et le contrôle de telles nano-structures ne peuvent être réalisés qu'à l'aide d'un microscope à effet tunnel.

30 Les principales méthodes connues de fabrication de fils atomiques sont indiquées dans ce qui suit.

Une première méthode connue consiste en un dépôt contrôlé d'adsorbat sur une surface solide.

Selon cette première méthode connue, en exploitant les propriétés d'anisotropie des surfaces solides et en contrôlant le flux du dépôt d'adsorbat ainsi que la température du substrat, il est possible de construire  
5 des fils atomiques.

La formation de ces fils est fondée soit sur des coefficients de collage anisotrope en surface, soit sur l'anisotropie de certaines structures métastables, soit sur une diffusion anisotrope.

10 A ce sujet, on consultera les documents (1) à (5) qui, comme les autres documents cités par la suite, sont mentionnés à la fin de la présente description.

Une deuxième méthode connue consiste en une nanolithographie avec la pointe d'un microscope à effet  
15 tunnel.

Les électrons issus de cette pointe du microscope à effet tunnel peuvent être utilisés pour produire, à l'échelle nanométrique, une réaction de décomposition ou de désorption.

20 En déplaçant la pointe du microscope à effet tunnel, on peut ainsi produire des fils atomiques.

A ce sujet, on se reportera au document (6).

On indique ci-après les performances comparées de ces méthodes connues.

25 La méthode de dépôt contrôlé permet de fabriquer des fils atomiques ayant toute la même direction sur une grande surface.

La composition de ces fils peut être bien définie.

Cependant, cette méthode présente des  
30 inconvénients.

En effet, les fils obtenus sont peu stables thermiquement, en raison notamment des substrats ou adsorbats employés.

De plus, la longueur de ces fils atomiques est généralement limitée à quelques dizaines de nanomètres et leur répartition sur la surface est aléatoire et donc non contrôlable.

5        En outre, il est à noter que lorsque la densité de ces fils sur la surface est grande, un phénomène de coalescence des fils est susceptible de se produire, ce qui conduit non plus à des fils mais à un ensemble bidimensionnel d'atomes.

10       La deuxième méthode connue, mentionnée plus haut, permet de fabriquer un réseau très régulier de fils atomiques.

La longueur de ces fils peut, potentiellement, être élevée.

15       Cependant, cette deuxième méthode connue présente les inconvénients suivants.

Les fils atomiques sont de mauvaise qualité à l'échelle atomique.

20       De plus, seul un petit nombre de fils peut être obtenu par cette méthode.

En outre, cette méthode demande généralement une surface à basse température, inférieure à 0°C.

#### **Exposé de l'invention**

25       La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients précédents.

Elle a tout d'abord pour objet des fils atomiques de grande longueur et de grande stabilité.

30       L'invention concerne également un procédé de fabrication de ces fils.

Ce procédé est le seul qui permette de produire un réseau régulier de fils atomiques de grande longueur sur une grande surface.

De plus, les fils atomiques fabriqués grâce à ce procédé ont une très grande stabilité thermique, jusqu'à une température de l'ordre de 1000°C, ce qui est sans commune mesure avec la stabilité thermique des  
5 fils atomiques obtenus avec les autres procédés connus, qui est de l'ordre de 200°C dans les meilleurs cas.

L'invention repousse donc considérablement les limites de stabilité connues à ce jour pour ce type de sub-nanostructure.

10 Par ailleurs, contrairement au procédé connu mentionné plus haut, le procédé objet de l'invention permet de contrôler le nombre de lignes ou fils atomiques en permettant d'obtenir des ensembles allant du super-réseau de fils atomiques jusqu'à un ensemble  
15 limité à un seul fil atomique sur une surface.

De façon précise, la présente invention a pour objet un ensemble de N fils atomiques, N étant un nombre entier au moins égal à 1, caractérisé en ce que ces fils sont formés sur la surface d'un substrat en  
20 SiC et sont des assemblages rectilignes de dimères d'un élément choisi parmi Si et C, ces assemblages étant parallèles les uns aux autres et sensiblement équidistants les uns des autres, s'étendant d'un bout à l'autre du substrat et étant perpendiculaires à la  
25 direction des dimères.

Selon un premier mode de réalisation particulier de cet ensemble, ladite surface est une surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si, lesdits assemblages étant des assemblages de dimères Si-Si.

30 Selon un deuxième mode de réalisation particulier, ladite surface est une surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée C, lesdits assemblages étant des assemblages de dimères C-C.

La présente invention concerne également un procédé de fabrication de l'ensemble de N fils atomiques objet de l'invention, caractérisé en ce qu'on forme des couches dudit élément sur ladite surface et  
5 on construit ledit ensemble au moyen de recuits de cette surface munie desdites couches.

On peut choisir la température et la durée du dernier des recuits pour obtenir un nombre N souhaité de fils atomiques sur une longueur donnée, comptée  
10 perpendiculairement aux fils.

De préférence, ledit ensemble est construit dans une enceinte maintenue à une pression inférieure à  $5 \times 10^{-9}$  Pa ou sous atmosphère neutre.

Selon un mode de mise en oeuvre préféré du procédé  
15 objet de l'invention, on forme un substrat monocristallin de SiC en phase cubique  $\beta$ -SiC (100), on transforme ce substrat pour que sa surface soit terminée Si et reconstruite  $3 \times 2$  et on recuit le substrat ainsi transformé à une température choisie  
20 dans l'intervalle allant de  $1000^{\circ}\text{C}$  à  $1150^{\circ}\text{C}$  de manière à éliminer progressivement de cette surface, par désorption sélective, des rangées de dimères Si-Si et à obtenir ledit ensemble de N fils atomiques.

Le temps pendant lequel on recuit le substrat  
25 ainsi transformé dépend des caractéristiques géométriques du substrat. Ce temps peut être choisi dans un intervalle allant de 5 minutes à 10 minutes.

Ledit substrat monocristallin peut être obtenu par dépôt chimique en phase vapeur d'un premier composé  
30 gazeux contenant du carbone et d'un deuxième composé gazeux contenant du silicium sur une surface vicinale de Si (100) désorientée de  $4^{\circ}$ .

Le premier composé gazeux peut être  $C_3H_8$  et le deuxième composé gazeux peut être  $SiH_4$ .

De préférence, on recuit ledit substrat monocristallin pour que sa surface devienne une surface  
5 de structure  $1 \times 1$  riche en carbone, on dépose des couches de silicium sur cette surface à température ambiante puis on recuit le substrat muni de ces couches de silicium à environ  $1000^\circ C$  pour obtenir une surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si et reconstruite  $3 \times 2$ .

10 La présente invention a de nombreuses applications.

On indique dès à présent qu'elle s'applique à la fabrication d'un ensemble de fils d'une matière métallique, magnétique, polymérique, organique, semi-  
15 conductrice, isolante ou biologique, en utilisant ledit ensemble de N fils atomiques en tant que matrice recevant un dépôt de ladite matière.

La présente invention s'applique également à l'adressage parallèle de dispositifs électroniques dont  
20 la taille est de l'ordre de 0,1 nm à 10 nm, les fils atomiques ayant une épaisseur de l'ordre de 0,1 nm à 10 nm.

Les fils atomiques objets de l'invention diffèrent de ce qui a été proposé dans l'art antérieur à la fois  
25 par le procédé de fabrication et par la nature du produit obtenu.

En effet, le choix du substrat, le procédé utilisé et la qualité des fils obtenus sont très différents de ce qu'enseigne l'art antérieur.

30 En ce qui concerne le choix du substrat, les fils atomiques obtenus le sont sur la surface d'un matériau

semiconducteur réfractaire, le carbure de silicium, de préférence dans sa phase cubique  $\beta$ -SiC.

Le carbure de silicium est un matériau ayant de très bonnes caractéristiques, à savoir une grande  
5 stabilité thermique, une grande stabilité chimique, une capacité de supporter des environnements très hostiles (hautes températures, rayonnements ionisants, milieux chimiques agressifs).

C'est aussi une céramique ayant une grande dureté  
10 (qui est proche de celle du diamant et de celle du carbure de bore).

Enfin, c'est l'un des meilleurs matériaux bio-compatibles connus.

On a en particulier vérifié que les fils de  
15 silicium fabriqués sur le  $\beta$ -SiC (100) sont très stables thermiquement, jusqu'à environ 1000°C, et chimiquement.

Dans les méthodes connues, les substrats utilisés sont le Si (100) ou des surfaces de métaux monocristallins comme par exemple Pt (110) ou Au (100).

20 Dans tous les cas, les fils atomiques sont instables thermiquement.

Dans le cas du procédé de dépôt contrôlé, cette instabilité est inhérente au procédé lui-même qui repose sur la dépendance de la diffusion de surface  
25 avec la température.

Dans le cas du procédé nanolithographique avec un microscope à effet tunnel, l'instabilité provient du choix du matériau (H/Si par exemple) qui est instable à partir d'une température de l'ordre de 300°C à 400°C.

30 Les procédés fondés sur le contrôle de la diffusion de surface en fonction de la température permettent seulement de produire des fils atomiques qui



ne sont stables qu'à une seule température et qui se modifient quand la température change.

Dans la présente invention, on utilise de préférence un procédé fondé sur la désorption sélective  
5 à haute température, entre 1000°C et 1150°C.

Le contrôle de la densité des fils atomiques est assuré par le contrôle de la température de surface.

Une fois réalisés, ces fils sont très stables en dessous de 1000°C.

10 En ce qui concerne la qualité des fils atomiques obtenus, notamment sur le  $\beta$ -SiC (100), on précise que ces fils atomiques ont des caractéristiques uniques qui ne peuvent être obtenues par d'autres procédés.

La longueur de ces fils atomiques n'est limitée  
15 que par le substrat sur lequel on les forme.

Ces fils atomiques sont tous parallèles, ont de bonnes qualités à l'échelle atomique et peuvent former des réseaux dont on peut contrôler la densité.

Ces fils sont très stables chimiquement et surtout  
20 thermiquement jusqu'à environ 1000°C.

#### Brève description des dessins

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation  
25 donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue de dessus schématique d'un ensemble de fils atomiques conforme à l'invention et  
30 de grande densité (super-réseau),
- la figure 2 est une vue de dessus schématique d'un autre ensemble de fils atomiques conforme à l'invention, de densité plus faible,

- la figure 3 est une vue de dessus schématique d'un fil atomique isolé conforme à l'invention ( $N=1$ ),
- la figure 4 est une vue en coupe schématique d'une surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si et reconstruite 3x2,
- la figure 5 est une vue de dessus schématique de la figure 4,
- la figure 6 est une vue en coupe schématique d'une surface de  $\beta$ -SiC (100), terminée c (4x2),
- la figure 7 est une vue de dessus schématique de la figure 6,
- les figures 8 et 9 sont des vues en coupe schématiques de surfaces de  $\beta$ -SiC (100), terminées Si et reconstruites nx2, n étant un nombre impair supérieur à 3, et
- la figure 10 illustre schématiquement une application de l'invention à l'adressage parallèle de nano-objets.

## 20 **Exposé détaillé de modes de réalisation particuliers**

L'invention concerne donc des lignes ou fils atomiques de grande longueur, formés sur la surface d'un substrat en carbure de silicium.

On est capable de faire varier les distances entre les fils atomiques de manière contrôlée, de 1 nm à plusieurs millimètres.

Ceci est schématiquement illustré en vue de dessus par les figures 1 à 3.

On voit sur les figures 1 et 2 des fils atomiques 2 qui sont des assemblages de dimères de silicium (Si-Si) référencés 4, sont très rectilignes et ont tous la même direction D.

Leur longueur  $L$  est très grande (supérieure à 100 nm) et n'est limitée que par la longueur du substrat 6 sur lequel ces fils 2 sont formés.

Ces fils sont régulièrement espacés les uns des autres.

Ils s'étendent perpendiculairement à la direction  $d$  des dimères.

On est capable de faire varier le nombre  $N$  de fils atomiques avec la température pour passer d'un super-réseau de fils atomiques, qui sont séparés les uns des autres d'une distance de l'ordre de quelques dixièmes de nanomètres (figure 1), à un ensemble de fils atomiques qui sont séparés les uns des autres d'une distance  $A$  de l'ordre de quelques nanomètres (figure 2) et même passer de cet ensemble à un seul fil atomique isolé 2 qui est séparé d'autres fils atomiques (non représentés) d'une distance de plusieurs dizaines de nanomètres (figure 3).

On a dessiné sur les figures 1 à 3 les dimères 4 et l'on voit bien que la direction  $D$  des fils atomiques est perpendiculaire à la direction  $d$  de ces dimères 4, cette direction  $d$  étant donnée par la ligne droite qui passe par les centres des deux atomes de silicium appartenant au même dimère.

Comme on l'a vu plus haut, ces fils atomiques sont stables jusqu'à une température de l'ordre de 1000°C.

On explique ci-après un procédé de fabrication des fils atomiques en silice du genre de ceux des figures 1 à 3.

On part d'une surface  $\beta$ -SiC (100) terminée Si et reconstruite  $3 \times 2$ .

La préparation d'une telle surface est décrite dans les documents (7) et (8) auxquels on se reportera.

A partir de cette surface, on passe à une autre reconstruction de surface, la  $c(4 \times 2)$ , par désorption thermique du silicium.

A ce sujet, on consultera le document (7).

5 Les états qui nous intéressent dans la présente invention sont ceux qui apparaissent entre ces deux reconstructions de surface.

Les rangées de dimères de silicium sont éliminées progressivement de la surface reconstruite  $3 \times 2$ , par  
10 recuit à des températures comprises entre  $1000^\circ\text{C}$  et  $1150^\circ\text{C}$  et pendant des temps variables allant d'environ 5 minutes à 10 minutes.

Les fils atomiques qui font l'objet de l'invention apparaissent à la transition de phase entre la  
15 reconstruction  $3 \times 2$  et la reconstruction  $c(4 \times 2)$ .

Le nombre  $N$  de fils atomiques et l'espacement  $A$  entre ceux-ci dépendent de la température et de la durée de ce recuit.

La fabrication des fils atomiques est effectuée  
20 dans une enceinte étanche (non représentée), maintenue à une pression inférieure à  $5 \times 10^{-9}$  Pa.

Le substrat de carbure de silicium utilisé est de préférence un film monocristallin très mince, d'une épaisseur de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$ , de carbure de silicium en  
25 phase cubique  $\beta\text{-SiC}$  (100).

Il est obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (ou CVD) de  $\text{C}_3\text{H}_8$  et de  $\text{SiH}_4$  sur une surface vicinale de Si (100) désorientée de  $4^\circ$ .

On peut aussi utiliser, en tant que substrat, un  
30 monocristal de SiC massif.

A ce sujet, on consultera les documents (9), (10) et (11).

Ensuite, le substrat monocristallin de carbure de silicium en phase cubique  $\beta$ -SiC (100) est soumis à une succession de recuits qui permet d'éliminer de la surface du substrat des oxydes natifs de silicium et du  
5 carbone résultant du procédé de fabrication CVD, ce qui conduit à une structure de surface 1x1 riche en carbone.

On dépose ensuite successivement des couches (au moins deux) de silicium à température ambiante (de  
10 l'ordre de 20°C) sur cette surface.

Puis on effectue des recuits du substrat résultant à environ 1000°C.

Ceci conduit à une surface plane de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si, c'est-à-dire riche en silicium, et ayant  
15 la reconstruction de surface 3x2.

La figure 4 est une vue en coupe transversale schématique du substrat de  $\beta$ -SiC (100) dont la surface est terminée Si et reconstruite 3x2.

On voit sur cette figure 4, le film très mince de carbure de silicium monocristallin 8 formé sur une  
20 plaquette 10 de Si (100).

La surface de ce substrat 8 est formée par une monocouche de carbone 12.

Cette monocouche de carbone 12 est elle-même  
25 recouverte par une monocouche de silicium 14.

Cette monocouche de silicium 14 est recouverte par une monocouche dépeuplée 16 d'atomes de silicium, qui constitue un tiers de monocouche de silicium.

La figure 5 est une vue de dessus du substrat muni  
30 des monocouches 12 et 14 et de la monocouche dépeuplée 16.

On voit l'agencement des atomes de carbone 18 de la couche 12 au-dessus desquels se trouvent les atomes de silicium 20 de la monocouche de silicium 14.

On voit également des dimères asymétriques Si-Si  
5 référencés 22, l'ensemble de ces dimères 22 constituant la monocouche de silicium dépeuplée 16.

Dans cette couche 16, qui constitue la couche supérieure du substrat, les dimères asymétriques 22 ont tous le même angle d'inclinaison et l'on voit bien que  
10 les rangées de dimères sont perpendiculaires à la direction des dimères.

Pour chaque dimère 22, l'atome supérieur de silicium est représenté avec un cercle plus grand que celui de l'atome inférieur de silicium. —

15 Sur la figure 5, le rectangle 24 en pointillés représente la maille élémentaire de la surface reconstruite  $3 \times 2$ .

La distance  $a$  est égale à  $a_0/\sqrt{2}$ ,  $a_0$  étant le paramètre de maille de  $\beta$ -SiC en volume.

20 On a également noté les directions  $[110]$  et  $[-110]$  du  $\beta$ -SiC  $(100)$ .

La figure 6 est une vue en coupe transversale schématique du substrat dont la surface est reconstruite  $c$   $(4 \times 2)$ , cette reconstruction étant  
25 obtenue par recuit du substrat de la figure 4.

On voit encore la plaquette de silicium 10, le film 8 de carbure de silicium et la monocouche de carbone 12.

On voit aussi une monocouche de silicium 26 qui  
30 est un réarrangement de la monocouche 14 de la figure 4, la monocouche dépeuplée 16 ayant disparu.

La figure 7 est une vue de dessus du substrat muni de ces couches 12 et 26.

On voit encore sur la figure 7 les atomes 18 de la monocouche de carbone 12.

5 On voit aussi les atomes de la monocouche de silicium 26..

Ces atomes forment aussi des dimères Si-Si.

On distingue les dimères Si-Si inférieurs qui sont référencés 28 et les dimères Si-Si supérieurs qui sont  
10 référencés 30 et représentés par des cercles plus gros que ceux des dimères inférieurs.

Sur la figure 7, le rectangle en pointillés 32 représente la maille élémentaire de la surface reconstruite  $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$  du  $\beta$ -SiC (100).

15 La figure 8 est une vue en coupe transversale schématique illustrant une phase intermédiaire entre les phases des figures 4 et 6.

Cette phase intermédiaire correspond à une reconstruction de type  $n \times 2$  où  $n$  est un nombre impair supérieur à 3 et par exemple égal à 5.  
20

La phase intermédiaire de la figure 8 est obtenue par recuit de la structure de la figure 4 et porte, à sa surface supérieure, des fils atomiques 32 conformes à l'invention.

25 Ceux-ci résultent d'une modification de la monocouche dépeuplée 16 de la figure 4, modification qui est due au recuit.

On voit également sur la figure 8 une monocouche de silicium 34 résultant d'une réorganisation de la  
30 couche 14 de la figure 4 sous l'effet du recuit.

A partir de cette phase représentée sur la figure 8, on passe encore, par un recuit, à une autre phase intermédiaire (correspondant aussi à une reconstruction

de type  $nx2$  où  $n$  est par exemple égal à 7) où les fils atomiques 32 sont plus espacés les uns des autres comme l'illustre schématiquement la figure 9.

On voit également sur la figure 9 une monocouche  
5 de silicium 36 qui résulte d'une réorganisation de la couche 34 de la figure 8 sous l'effet du recuit.

Il est à noter qu'un recuit supplémentaire permet de passer de la structure représentée sur la figure 9 à la structure représentée sur la figure 6.

10 La présente invention n'est pas limitée à des fils atomiques de silicium.

Elle concerne aussi des fils atomiques de carbone, constitués par des agencements de dimères C-C.

On peut obtenir de tels fils atomiques de carbone  
15 en utilisant une approche identique à celle utilisée pour le fils de silicium.

Les fils atomiques objets de l'invention ont de nombreuses applications.

On indique tout d'abord que le carbure de silicium  
20 est un composé semiconducteur IV-IV très intéressant.

En effet, ce matériau a de nombreuses applications pratiques en micro-électronique (pour les hautes fréquences, les hautes températures, les hautes tensions et les hautes puissances) et en  
25 optoélectronique.

De plus, du fait de ses grandes stabilités thermique et chimique, le carbure de silicium est un matériau très attrayant pour fonctionner dans des environnements hostiles du genre de ceux que l'on  
30 rencontre en aéronautique, dans l'industrie spatiale, l'industrie automobile et l'industrie pétrolière, en géophysique et dans les réacteurs nucléaires.



En outre, le carbure de silicium est une céramique qui a de très intéressantes propriétés mécaniques, comme par exemple une grande dureté, et il est l'un des meilleurs matériaux biocompatibles notamment avec les  
5 cellules sanguines..

On indique tout d'abord une première application des fils atomiques objets de l'invention.

Des réseaux de fils atomiques conformes à l'invention peuvent être utilisés comme matrices pour  
10 la fabrication de réseaux analogues de fils métalliques, magnétiques ou polymériques.

Pour ce faire, on dépose sur un substrat portant un réseau de fils atomiques conformes à l'invention une matière métallique, magnétique, polymérique, organique,  
15 semi-conductrice, isolante ou biologique pour obtenir un réseau analogue de fils métalliques, magnétiques, polymériques, organiques, semi-conducteurs, isolants ou biologiques.

L'invention trouve également des applications en  
20 électronique.

La recherche d'une miniaturisation en électronique a conduit à la fabrication de dispositifs élémentaires de plus en plus petits qui peuvent atteindre 0,2  $\mu\text{m}$  ou 0,3  $\mu\text{m}$ .

25 Cependant, grâce aux nouvelles méthodes de manipulation individuelle d'atomes et de molécules, on peut maintenant envisager de construire des dispositifs encore plus petits, dont la taille peut aller de 0,1 nm à 10 nm.

30 Dans ce domaine, on cherche à réaliser des fonctions élémentaires pour l'électronique avec des nano-objets ayant cette taille.

Un problème difficile à résoudre concerne l'adressage de ces nano-objets.

Cet adressage nécessite des fils d'épaisseur également très petite, de l'ordre de 0,1 nm à 10 nm, et  
5 doit pouvoir s'effectuer de manière parallèle sur un très grand nombre (pouvant aller jusqu'à plusieurs millions) de nano-objets.

L'invention permet de résoudre ce problème au moyen d'un réseau de fils atomiques obtenus par exemple  
10 sur le  $\beta$ -SiC (100), ce réseau de fils atomiques constituant en quelque sorte un circuit imprimé à l'échelle nanométrique.

On peut ajuster la distance entre les fils atomiques à partir de 1 nm environ.

15 La figure 10 illustre schématiquement l'adressage parallèle mentionné plus haut.

On voit sur cette figure 10 un substrat 38 sur lequel sont formés des fils atomiques parallèles  
40 conformément à l'invention.

20 Ces fils 40 permettent l'adressage parallèle de dispositifs nano-électroniques 42 qui sont formées sur le substrat 38.

Un dispositif micro-électronique 44 également formé sur ce substrat 38 envoie des signaux de commande  
25 aux dispositifs 42 par l'intermédiaire des fils 40.

On mentionne également que les fils atomiques de silicium formés sur une surface de  $\beta$ -SiC (100) conformément à l'invention trouvent également un intérêt dans la réalisation d'écluses à électrons.

30 On peut également envisager le greffage, sur des fils atomiques conformes à l'invention ou entre ces fils, d'atomes de métaux ou d'atomes d'oxygène pour la

passivation ou encore de molécules organiques ou inorganiques.

On peut également envisager de découper de manière contrôlée, avec la pointe d'un microscope à effet tunnel, des morceaux de fils atomiques conformes à l'invention, afin d'assurer de manière flexible les connexions entre les différents nano-objets.

L'invention trouve également des applications en optique.

L'invention permet la réalisation d'un réseau nanométrique de champ électromagnétique ayant les mêmes caractéristiques géométriques (longueurs et distances interlignes) qu'un réseau de fils atomiques conformes à l'invention.

En effet, l'éclairage de ce réseau par un faisceau lumineux approprié est capable, localement, près de la surface où se trouve ce réseau, de produire une distribution de champ électromagnétique proche tout à fait originale, épousant la même répartition spatiale que les fils atomiques.

Ce réseau nanométrique de champ électromagnétique trouve des applications dans le dépôt assisté par laser de nano-structures atomiques sur une surface.

L'invention trouve encore des applications dans le domaine de la micromécanique.

Les propriétés tribologiques de surfaces portant des fils atomiques conformes à l'invention sont très anisotropes, ce qui les rend utiles dans les dispositifs micromécaniques impliquant des déplacements.

Les documents cités dans la présente description  
sont les suivants :

- 5 (1) H. Röder, E. Hahn, H. Brune, J.P. Bucher et K.  
Kern, **Nature** 366, 141 (1993).
- (2) S. Günther et al., **Phys. Rev. Lett.** 73, 553  
(1994).
- 10 (3) H. Itoh, J. Itoh, A. Schmid et T. Ichinokawa,  
**Phys. Rev. B** 48, 14663 (1993).
- (4) J.A. Yoshikawa, J. Nogami, C.F. Quate et P.  
Pianetta, **Surf. Sci.** 321, 2183 (1994).
- 15 (5) Y.W. Mo, J. Klein, M.B. Webb et M.G. Lagally,  
**Surf. Sci.** 268, 275 (1992).
- (6) T.C. Shen, C. Wang, G.L. Abeln, J.R. Tucker,  
J.W. Lyding, Ph. Avouris et R.E. Walkup,  
20 **Science** 268, 1590 (1995).
- (7) R. Kaplan et V.M. Bermudez, in Properties of  
Silicon Carbide, G. Harris Editor, **EMIS**  
**Datareview Series**, INSPEC (London), vol. 13,  
25 101 (1995).
- (8) F. Semond, P. Soukiassian, A. Mayne, G.  
Dujardin, L. Douillard et C. Jaussaud, **Phys.**  
**Rev. Lett.** 77, 2013 (1996).
- 30 (9) M. Riehl-Chudoba, P. Soukiassian et C.  
Jaussaud, J. **Appl. Phys.** 76, 1332 (1994).

(10)M. Riehl-Chudoba, S. Dupont et P. Soukiassian, **Surf. Sci.** 331-333, 625 (1995).

5 (11)M. Riehl-Chudoba, P. Soukiassian, C. Jaussaud et S. Dupont, **Phys. Rev. B** 51, 14300 (1995).

## REVENDICATIONS

1. Ensemble de N fils atomiques, N étant un nombre entier au moins égal à 1, caractérisé en ce que ces  
5 fils (2, 40) sont formés sur la surface d'un substrat (6, 38) en SiC et sont des assemblages rectilignes de dimères (4) d'un élément choisi parmi Si et C, ces assemblages étant parallèles les uns aux autres et sensiblement équidistants les uns des autres,  
10 s'étendant d'un bout à l'autre du substrat et étant perpendiculaires à la direction des dimères.

2. Ensemble de N fils atomiques selon la revendication 1, dans lequel ladite surface est une  
15 surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si, lesdits assemblages étant des assemblages de dimères Si-Si.

3. Ensemble de N fils atomiques selon la revendication 1, dans lequel ladite surface est une  
20 surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée C, lesdits assemblages étant des assemblages de dimères C-C.

4. Procédé de fabrication de l'ensemble de N fils atomiques selon la revendication 1, procédé caractérisé  
25 en ce qu'on forme des couches (14, 16) dudit élément sur ladite surface et on construit ledit ensemble au moyen de recuits de cette surface munie desdites couches.

30 5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel on choisit la température et la durée du dernier des recuits pour obtenir un nombre N souhaité de fils

atomiques sur une distance donnée, comptée perpendiculairement aux fils.

5 6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 et 5, dans lequel ledit ensemble est construit dans une enceinte maintenue à une pression inférieure à  $5 \times 10^{-9}$  Pa ou sous atmosphère neutre.

10 7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, dans lequel on forme un substrat monocristallin (8) de SiC en phase cubique  $\beta$ -SiC (100), on transforme ce substrat pour que sa surface soit terminée Si et reconstruite  $3 \times 2$  et on recuit le substrat ainsi transformé à une température choisie  
15 dans l'intervalle allant de  $1000^{\circ}\text{C}$  à  $1150^{\circ}\text{C}$  de manière à éliminer progressivement de cette surface, par désorption sélective, des rangées de dimères Si-Si et à obtenir ledit ensemble de N fils atomiques.

20 8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel on recuit le substrat ainsi transformé pendant un temps choisi dans l'intervalle allant de 5 minutes à 10 minutes.

25 9. Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit substrat monocristallin (8) est obtenu par dépôt chimique en phase vapeur d'un premier composé gazeux contenant du carbone et d'un deuxième composé gazeux contenant du silicium sur une surface vicinale de Si  
30 (100) désorientée de  $4^{\circ}$ .

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel le premier composé gazeux est  $C_3H_8$  et le deuxième composé gazeux est  $SiH_4$ .

5            11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 et 10, dans lequel on recuit ledit substrat monocristallin (8) pour que sa surface devienne une surface de structure 1x1 riche en carbone, on dépose des couches de silicium sur cette surface à  
10 température ambiante puis on recuit le substrat muni de ces couches de silicium à environ  $1000^{\circ}C$  pour obtenir une surface de  $\beta$ -SiC (100) terminée Si et reconstruite 3x2.

15            12. Application de l'ensemble de N fils atomiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 3 à la fabrication d'un ensemble de fils d'une matière métallique, magnétique, polymérique, organique, semi-conductrice, isolante ou biologique, en utilisant ledit  
20 ensemble de N fils atomiques en tant que matrice recevant un dépôt de ladite matière.

25            13. Application de l'ensemble de N fils atomiques selon l'une quelconque des revendications 1 à 3 à l'adressage parallèle de dispositifs électroniques (42) dont la taille est de l'ordre de 0,1 nm à 10 nm, les fils atomiques (40) ayant une épaisseur de l'ordre de 0,1 nm à 10 nm.



1/3

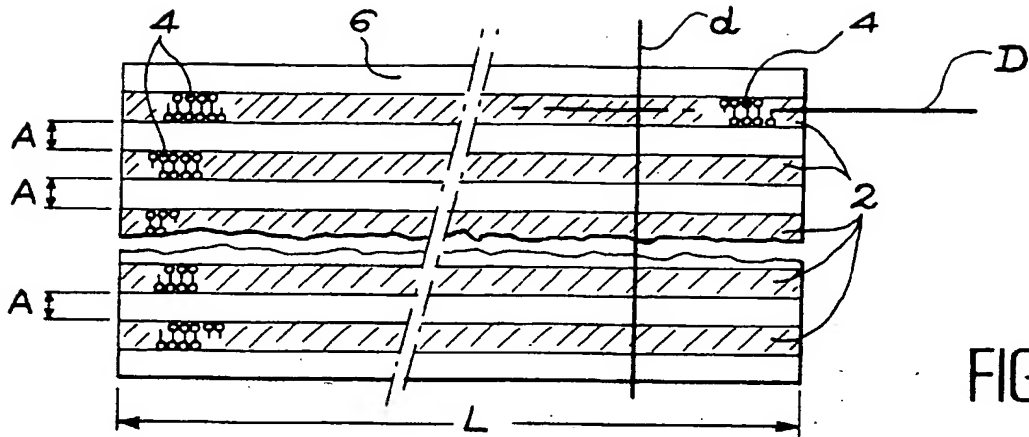


FIG. 1

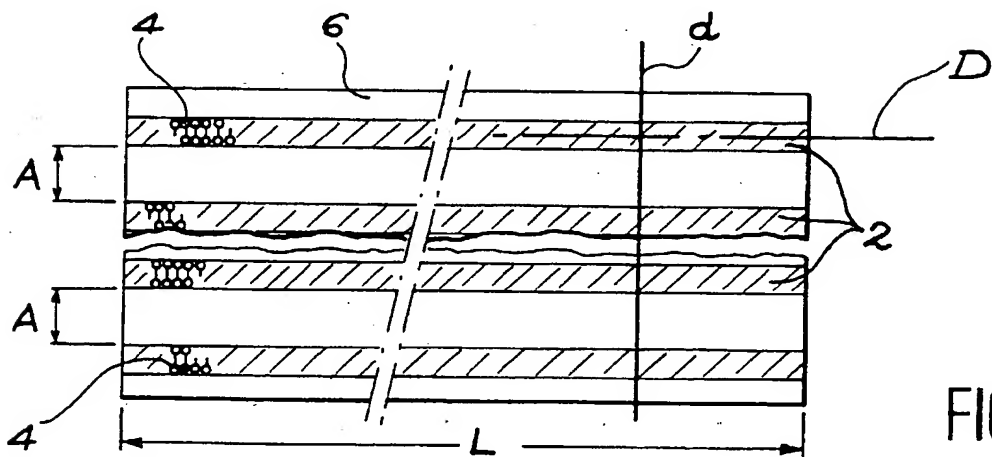


FIG. 2

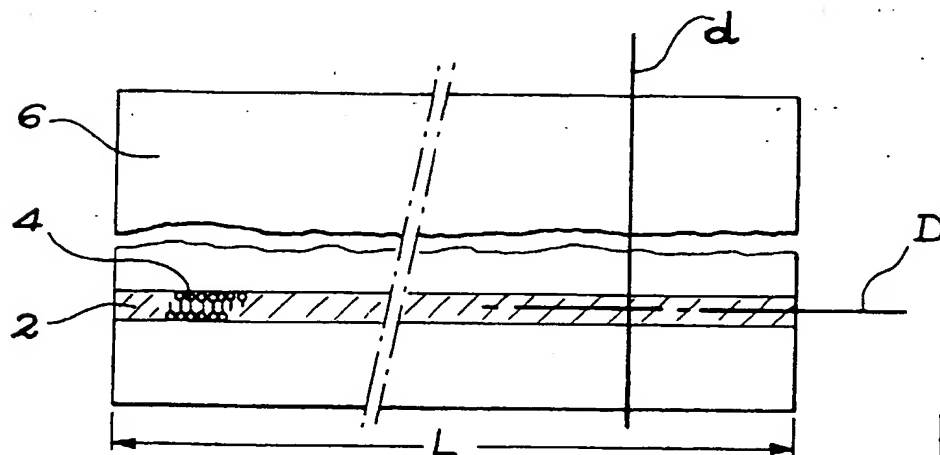


FIG. 3

2 / 3

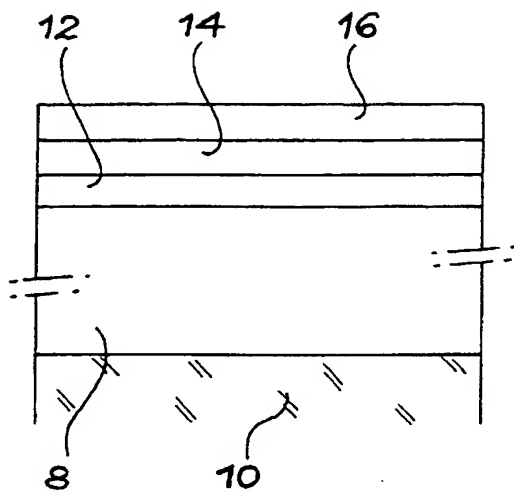


FIG. 4

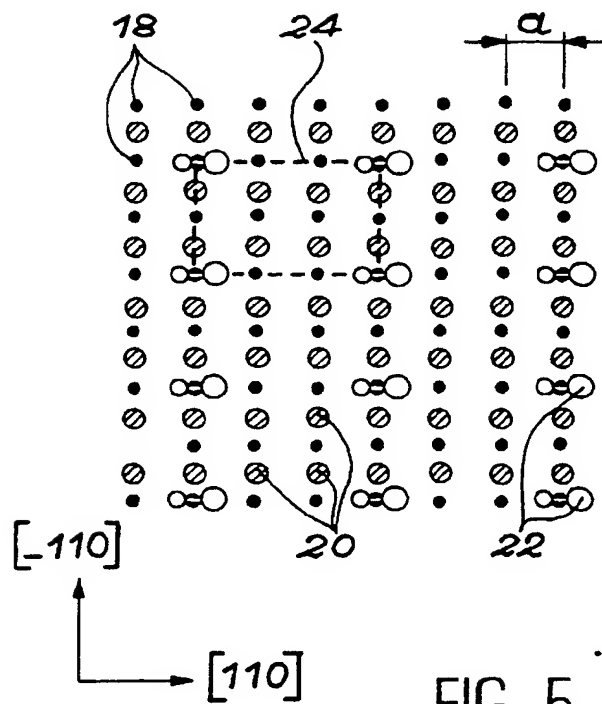


FIG. 5

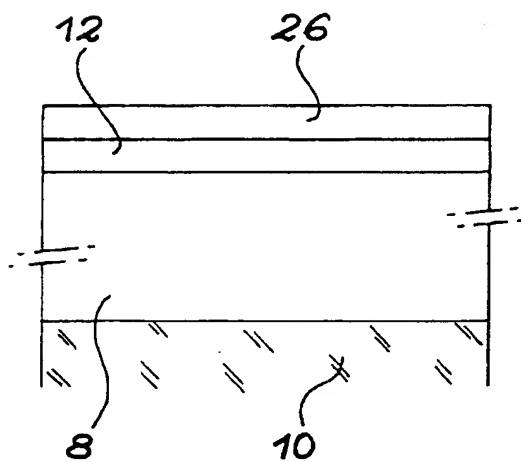


FIG. 6

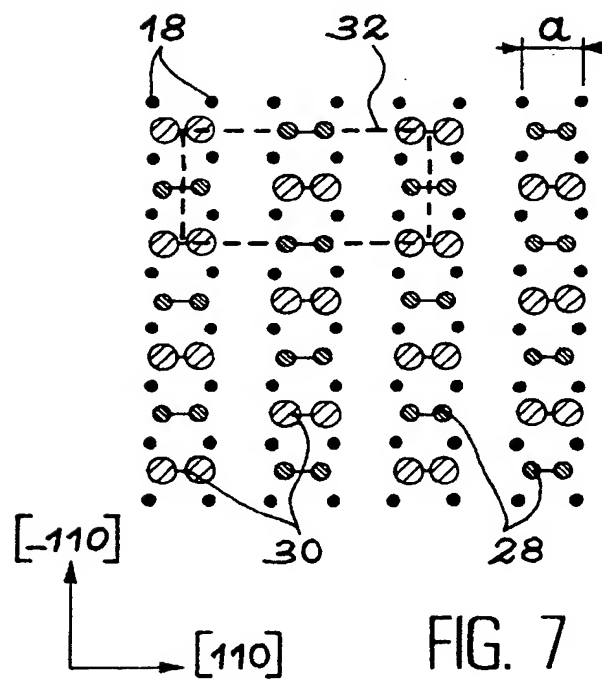


FIG. 7

3 / 3

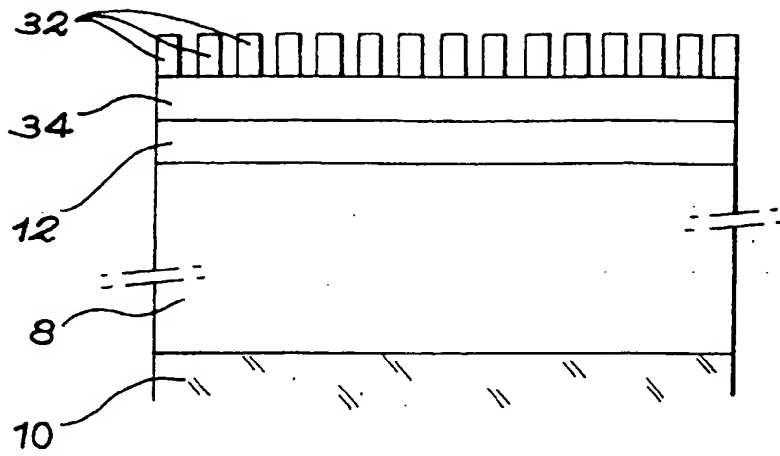


FIG. 8

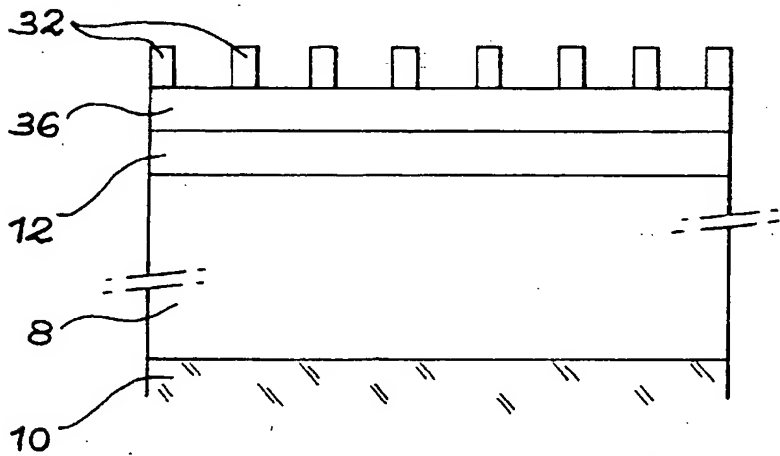


FIG. 9

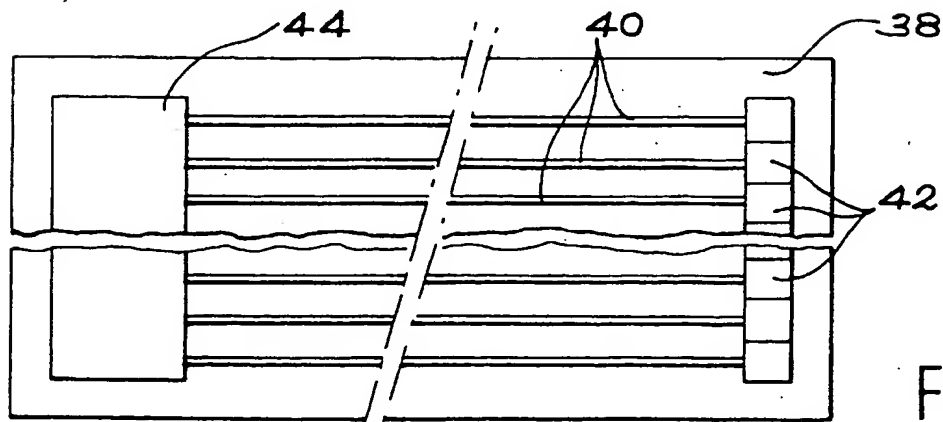


FIG. 10

INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 537678  
FR 9615435

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
D,X	PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 77, no. 10, 2 Septembre 1996, pages 2013-2016, XP000647083 SEMOND F ET AL: "ATOMIC STRUCTURE OF THE BETA-SIC(100)-(3X2)SURFACE" * page 2013 - page 2016 *	1,2,4-7, 9-11
A	US 5 363 800 A (LARKIN DAVID J ET AL) 15 Novembre 1994 * revendication 1; figure 4 *	9,10
D,A	SCIENCE, vol. 268, no. 5217, 16 Juin 1995, pages 1590-1592, XP000647904 SHEN T -C ET AL: "ATOMIC-SCALE DESORPTION THROUGH ELECTRONIC AND VIBRATIONAL EXCITATION MECHANISMS" * page 1590 *	2,6
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
		H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
12 Juin 1997		Hammel, E
<b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b>		
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document Intercalaire		
T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant		

1  
EPO FORM 1503 OL 82 (P4C13)